Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

A Brief Review of the Mechanical Properties of Metal Sheets Processed by the Equal Channel Angular Rolling Process

Review Article

Asiyeh Habibi[1]

DOI: 10.22067/jmme.2025.91620.1179

1- Equal Channel Angular Rolling process

The Equal Channel Angular Rolling (ECAR) process is designed by introducing two rolls to the ECAP equipment for overcoming the discontinuities observed in the previous method for producing ultra-fine structures. Ultra-fine structures are produced continuously by shear deformation of metal strips. In the ECAR die, the channel intersection angle, Φ, is typically 120 degrees, and the curvature angle of the die, Ψ, is zero degrees. Friction between the rolls and the metal sheet provides the force required for ECAR. The maximum feeding force is constrained by the attainable thickness reduction ratio, contact area, and the friction coefficient between the rolls and the sheet. In order to reduce die friction and deformation resistance in ECAR, the outlet-channel cross-section is designed to be slightly larger than the inlet-channel cross-section. During rolling, the sheet thickness first reduces and then increases as it travels through the deformation region around the junction of the two channels.

2- Mechanical Properties of ECARed Materials

In the ECAR process, materials experience high strain in passing through the intersection between channels, and this strain affects their microstructure as well as their mechanical properties. According to research, the ECAR process can enhance the mechanical properties of metals and alloys through increased dislocation density and grain size refinement. Metals and alloys having face-centered cubic (FCC) and body-centered cubic (BCC) crystal structures find good formability as they can withstand high strains due to successive passes in the ECAR process. The ECAR process on sheets of aluminum alloy, low carbon steel, and pure copper has been established to have better mechanical characteristics. The initial pass of ECAR results in an abrupt increase in strength and in microhardness, accompanied by a decrease in ductility. As processing advances, the improvement in strength in the range of the first and third pass becomes small, and these characteristics remain substantially unchanged after processing in the third pass.

The rapid improvement in mechanical properties is due to an increased dislocation density and the development of an ultrafine grain structure. The ultrafine grain structure is formed in several stages: initiation of dislocation cells, transformation of these dislocation cells through polygonal dislocation walls due to increased strains, transformation of these dislocation walls into boundaries, and transformation of an ultrafine grain structure throughout the material.

Materials possessing a hexagonal close-packed (HCP) crystal structure, including titanium and magnesium alloys, commonly have limited deformation modes and develop a strong crystallographic texture during rolling, limiting subsequent deformation. The materials, therefore, face significant limitations when activating slip systems, and an external input of energy in terms of heat supply is commonly necessary to allow severe plastic deformation without accompanying cracking. In addition to dislocation slip in HCP materials, severe plastic deformation may involve twinning. The twinning can be tensile, compressive, or recrystallization-type, depending on the crystallographic texture and the nature of the deformation. Table 1 shows some ECARed alloys' mechanical properties.

Figure 1 demonstrates that, for the soft metals like aluminum alloys, steel, and copper, the transformation of the tensile strengths takes place sharply during the first pass up to maximum values between the second and the fourth passes. The ductility of most metal sheets following the ECAR process tends to fall sharply during the first pass, with successive passes further reducing the ductility. Thus, increasing beyond three passes, besides incurring additional ECAR costs, yields only a slight increase in strength and may even degrade mechanical properties while reducing ductility.

Metals of an HCP structure, including magnesium alloys, develop grain refining by ECAR, but the variation in yield and tensile strength differs from that of other classes of metals, often accompanied by a marked decrease in these mechanical properties. Moreover, ECAR in these metals increases ductility. As for titanium, also of an HCP structure, projected trends for strength may coincide with those for the magnesium alloys, but the improvement defined by the successive passes from the sole study recorded calls for further investigation.

* Manuscript received January 21, 2025, Revised July 27, 2025, Accepted October 06, 2025 .

1 Assistant professor, Department of mechanical engineering, Lorestan University, Lorestan, Khorramabad, Iran.
Email: habibi.a@lu.ac.ir

Comparison of microstructure and tensile characteristics of pure copper processed by ECAR and ECAP reveals the same values for the same channel angle. The mechanical properties after ECAR exhibit a sequence similar to ECAP, characterized by increasing strength and decreasing ductility. The principal distinction of the two processes is the continuous nature of ECAR relative to ECAP. Although the widespread pattern of tensile properties for the two processes resembles each other, the ECAR process reveals a higher strain value for the metal for a specified channel angle.

3- Conclusion

In this paper, a review was conducted of the reported mechanical properties of materials after the ECAR process, with the results classified into two groups: materials with FCC and BCC structures, and materials with HCP structures. The research reports indicate the greatest variation of the mechanical properties occurred during the first three passes; after this, variation becomes extremely minute or, for a few, reverses. For HCP structure-based alloys, ECAR uses preheating as well as inter-pass heat treatment to compensate for the limited formability so as to refine the grains and attain nanoscale structures. However, the effect of ECAR on mechanical properties for metals with HCP structures, such as magnesium alloy AZ31, differs: ductility is improved while strength is reduced.

Table 1: Results from examining the mechanical properties of some metals and alloys after the ECAR process

	Author	Pass	Alloy	Results
1	Nemati Chari et al.	5	5083 Al	Increase in microhardness by approximately 18.5% in the first three passes, followed by a slight decrease. Increase in yield strength and tensile strength by 71% and 13%, respectively, in the first pass, with very small changes as the number of passes increases. 40% reduction in elongation after the first pass, with minor changes as the process passes continue
2	Bozcheloei et al.	3	5083 Al	Increase in microhardness by about 52% after three passes. Increase in yield strength and tensile strength by 94% and 19%, respectively, after the first three passes. 60% reduction in elongation after the third pass
3	Kvačkaj et al.	13	Pure Cu	Increase in microhardness by about 13% after 5 passes; the rate of increase after the fifth pass was very low. Increase in yield strength and ultimate tensile strength by 470% and 74%, respectively, only in the first pass, with negligible changes thereafter. Reduction in cross-sectional area in the first seven passes occurred at a high rate, but after reaching pass 13, it nearly returned to the initial value.
4	Habibi et al.	10	Pure Cu	70% increase in microhardness in the first two passes, followed by minor increases in microhardness with further passes. Increase in yield strength and ultimate tensile strength by 145% and 23% in the first three passes, with subsequent changes being very small. Decrease in elongation in the first three passes by 67%.
5	Hassani et al.	10	AZ31 Mg	Increase in microhardness by about 50%. Decrease in yield strength and tensile strength by 37% and 52%, respectively. Increase in elongation from 13% in the initial sample to 79% after 10 passes
6	Chen et al.	5	AZ31 Mg	Decrease in yield strength and tensile strength by 58% and 5%, respectively. Increase in elongation from 14% in the initial sample to 24% after 5 passes
7	Honarpisheh et al.	4	Ti	Increase in microhardness by 40%. Increase in yield strength and ultimate tensile strength by 72% and 52%, respectively

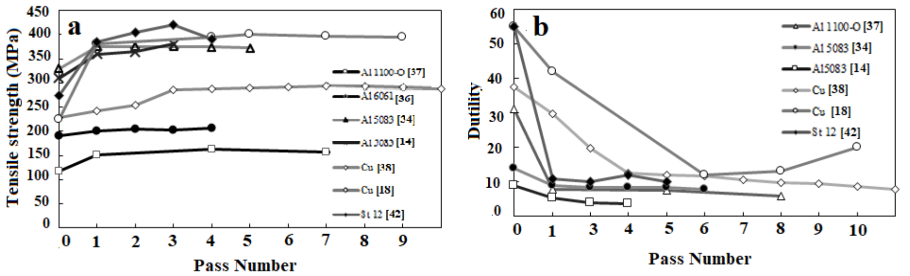


Figure 1 shows the changes in a) Tensile Strength, and b) Ductility with an increasing number of ECAR process passes on different metals.

مهندسی متالورژی و مواد، ۳۷، ۱، ۱۴۰۵. (۵۸-۳۵)

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

مروری مختصر بر خواص مکانیکی ورق‌های فلزی پس از فرایند نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر*

مقاله مروری

آسیه حبیبی(۱)

DOI: 10.22067/jmme.2025.91620.1179

چکیده *نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر بر اساس فرایند پرس‌زاویه‌ای با کانال‌های برابر، یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید است. این فرایند به منظور غلبه بر محدودیت ناپیوستگی و نیز عدم به‌کارگیری ورق‌های نازک در فرایند پرس‌زاویه‌ای با کانال‌های برابر گسترش یافته است. این فرایند توانایی اعمال تغییر شکل برشی شدید و ایجاد ساختار فوق ریزدانه و نیز بهبود خواص مواد در ورق‌های نازک را بدون تغییر در ابعاد دارد. پارامترهای فرایند مانند تعداد پاس، مسیر فرایند و دمای پیش‌گرم، برای تحلیل رفتار مکانیکی در مواد مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با تمرکز بر اثر تعداد پاس‌ها و مسیر فرایند، اثر فرایند نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر بر خواص مکانیکی مانند استحکام تسلیم و کششی، ازدیاد طول و میکروسختی در آلیاژهای مختلف به اختصار ارائه می‌شود. علی‌رغم بهبود خواص مکانیکی در ورق‌ها با تکرار تعداد پاس در فرایند نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر، تکرار بیش از سه پاس فرایند برای بهبود خواص، منطقی به نظر نمی‌رسد.*

واژه‌های کلیدی نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر، تغییر شکل پلاستیک شدید، خواص مکانیکی، استحکام تسلیم، استحکام کششی، انعطاف‌پذیری، میکروسختی.

A Brief Review of Mechanical Properties of Metal Sheets processed by Equal Channel Angular Rolling Process

Asiyeh Habibi

Abstract *Equal channel angular rolling based on the equal channel angular pressing is a severe plastic deformation process. This process has been developed to overcome the limitations of discontinuity and the lack of using strips in the equal channel angular pressing process. This process has the ability to apply severe shear deformation and fabricate ultra-fine grained structure, as well as improve the material properties of thin sheets without changing the dimensions. Process parameters such as rolling pass number and route have been investigated to analyze the mechanical behavior of materials. In the present study, the impact of equal channel angular rolling process on the mechanical properties such as yield and tensile strength, elongation and microhardness in different alloys of materials is briefly summarized by focusing on the effect of pass number and rolling route. Despite the improvement of mechanical properties in sheets by repeating the number of equal channel angular rolling process passes, repeating more than three process passes to improve the properties does not seem logical.*

Keywords Equal channel angular rolling, Severe plastic deformation, Yield strength, Tensile strength, Ductility, Microhardness.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۱/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۷/۱۴ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول؛ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، لرستان، خرم‌آباد.

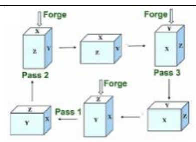
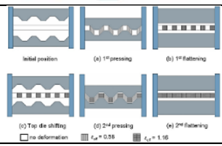
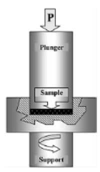
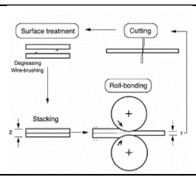
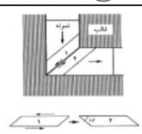
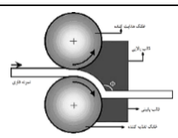
Email: habibi.a@lu.ac.ir

مقدمه

خواص مکانیکی در دمای اتاق و رفتار سوپرپلاستیک در دمای بالا در فلزات پلی‌کریستالی به ویژگی‌های میکروساختاری و به ویژه به اندازه دانه مواد وابسته است. بر اساس رابطه هال ـ پچ کاهش در اندازه دانه منجر به بهبود استحکام در فلزات در دمای اتاق می‌شود. کاهش در اندازه دانه همچنین قابلیت سوپرپلاستیک در دمای بالا، ضریب اصطکاک کم، مقاومت به سایش بالا، عمر خستگی سیکل بالای بهبود یافته و مقاومت به خوردگی خوب را فراهم می‌کند [1,2]. اندازه دانه یکی از ویژگی‌های بسیار مهم در میکروساختار فلزات پلی‌کریستالی است. روش تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) فرایندهای تغییر شکل فلزی پیشرفته‌ای دارد که مقادیر بالای تنش هیدرواستاتیک را بدون تغییر در سطح مقطع مواد به آن‌ها اعمال می‌کند و قادر به تولید مواد فوق ریزدانه (UFG) با مرز بزرگ‌زاویه است. طی سال‌های گذشته تعداد زیادی فرایند SPD برای تولید مواد UFG و نانو دانه مورد استفاده قرار گرفته است که تفاوت اصلی بین آن‌ها رفتار تغییر شکل، شکل قطعه، کرنش اعمال شده در هر پاس و بار مورد نیاز فرایند است [3].

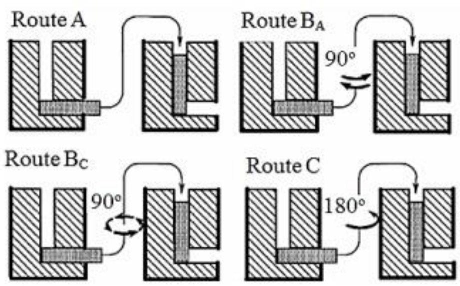
از بین فرایندهای SPD، فرایندهای پرس زاویه‌ای با کانال‌های برابر (ECAP)، تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد (HPT)، آهنگری چندگانه (MDF)، پرسکاری شیاری محدودشده (CGP)، اکستروژن پیچشی (TE) و اتصال به روش نورد تجمعی (ARB) بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [4]. جدول (۱) شماتیک و مقایسه خواص همراه با مزایا و معایب این فرایندها را نشان می‌دهد. اگر چه این روش‌ها به مواد فوق‌ریزدانه (UFG) با استحکام بالا می‌رسند ولی به علت محدودیت ابعادی قطعاتی که تحت این فرایندها قرار می‌گیرند، قادر به تولید انبوه نیستند.

جدول ۱ مقایسه روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید در ایجاد ساختار فوق ریزدانه در فلزات

نام فرایند	مرجع	شماتیک فرایند	شکل نمونه	پیوستگی فرایند	تغییر ابعاد	دمای فرایند	کرنش معادل پس از یک پاس
آهنگری چندگانه	[5]		بالک	ناپیوسته	ندارد	دمای بالا	۰/۵
پرسکاری شیاری محدود شده	[6]		ورق	ناپیوسته	ندارد	دمای محیط	۰/۵۸
اکستروژن پیچشی یا تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد	[1]		سکه مانند	ناپیوسته	ندارد	دمای محیط	بسته به شعاع و ضخامت قطعه تا ۰/۸ در یک پاس
اتصال به روش نورد تجمعی	[7]		ورق	ناپیوسته	ندارد	دمای محیط و بالاتر	۰/۸
پرس زاویه‌ای با کانال‌های برابر	[3]		بالک	ناپیوسته	ندارد	دمای محیط	بسته به زاویه کانال و انحنا تا کرنش معادل ۱ در هرپاس
نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر	[8]		ورق	پیوسته	ندارد	دمای محیط	بسته به زاویه کانال و انحنا تا کرنش معادل ۰/۶ در هر پاس

در بین این روش‌ها ECAP جذاب‌ترین روش برای تولید مواد نانوکریستالی است. در روش ECAP نمونه‌ها به درون قالبی با دو کانال مشابه که نسبت به هم زاویه‌دار هستند اکسترود می‌شوند و تغییر شکلی از نوع برشی به نمونه اعمال می‌شود. نمونه‌های مورد استفاده به شکل میله یا شمش هستند. در اثر این تغییر شکل شدید، تغییر ابعاد محسوسی در نمونه رخ نمی‌دهد ولی خواص مکانیکی و میکروساختار آن در نتیجه کرنش برشی دچار تغییر می‌شوند [9,10] برای تکرار فرایند بر روی یک نمونه مسیرهای مختلفی استفاده می‌شود که در شکل (۱) نشان داده شده است [11].

امروزه فرایندهای SPD از ابعاد تحقیقات آزمایشگاهی خارج شده و وارد تولید اقتصادی برای تولید مواد UFG شده است. بنابراین ساده کردن عملیات فرایند و به دست آوردن خواص منحصر به فرد مواد بسیار اهمیت دارد و تلاش‌هایی برای اصلاح روش‌های SPD انجام می‌شود. متأسفانه علی‌رغم پژوهش‌های فراوان در زمینه فرایند ECAP کاربرد این فرایند در صنعت بسیار دور از واقعیت است. معایب ذاتی فرایند مانند محدودیت در طول قطعه، بازکردن قالب‌های سنگین برای خروج قطعه‌ها را می‌توان از جمله عوامل اصلی در مهار سازگاری صنعتی فرایند ECAP دانست [10].

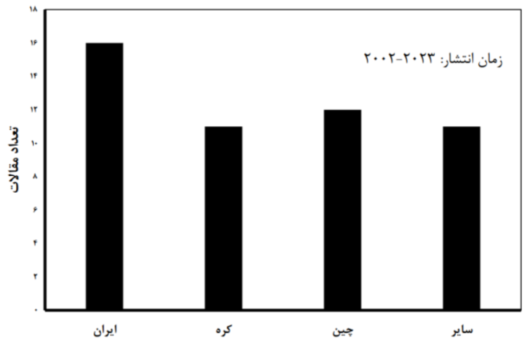


شکل ۱ مسیرهای ممکن در فرایند ECAP [11]

یکی از روش‌های بهبود یافته، نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر (ECAR) است که بر اساس فرایند ECAP برای رفع عیب عدم پیوستگی و نیز قابلیت استفاده برای ورق‌های نازک و بلند گسترش یافته است [12]. این فرایند با نام‌هایی مانند پرس زاویه‌ای با کانال‌های نابرابر (DCAP) و برش نوار محدود شده پیوسته (CCSS) نیز مطرح شده است [12,13]. در این روش ورق‌های نازک فلزی بدون تغییر در ابعاد تحت کرنش برشی از کانال‌های متقاطع قالب عبور می‌کنند. این فرایند قابلیت صنعتی شدن را دارد. مواد مختلفی مانند آلومینیم، مس، منیزیم و سایر مواد می‌توانند با استفاده از فرایند ECAR تولید شوند و خواص مکانیکی، میکروساختار و تنش باقی‌مانده و بافت آن‌ها بررسی شود [14,15]. از جمله پارامترهای مؤثر بر خواص و ریزساختار در فرایند ECAR تعداد پاس نورد، مسیر نورد، لقی بین ورق و کانال، ساختار قالب، دما و زمان پیش‌گرم قالب و قطعه هستند [16,17]. زاویه بین دو کانال از متغیرهای فرایند است ولی بررسی متن غالب مطالعات تجربی نشان دهنده استفاده از زاویه ۱۲۰ درجه بین دو کانال در فرایند ECAR است.

بر اساس رابطه هال ـ پچ، مواد UFG تولید شده به روش‌های SPD، استحکام بالا و انعطاف‌پذیری کم در مقایسه با نمونه درشت‌دانه اولیه دارند. استحکام این مواد با افزایش کرنش افزایش می‌یابد و این شرایط منجر به کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود [1]. در برخی نتایج ارائه شده در فرایند ECAR، نشان داده شده است که با وجود افزایش در استحکام با افزایش تعداد پاس فرایند ECAR، کاهش انعطاف‌پذیری بسیار کم است [18].

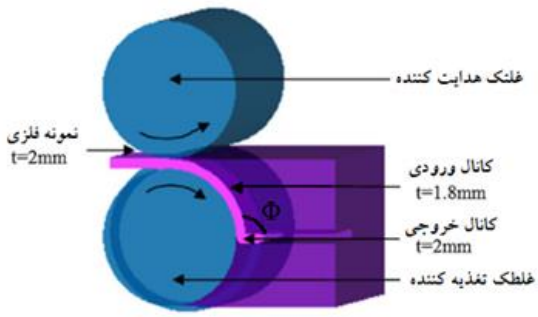
مقالات مروری زیادی در رابطه با فرایند پرس زاویه‌ای با کانال‌های برابر (ECAP) منتشر شده است [4,10] و [19-21] ولی در رابطه با فرایند نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر (ECAR) تعداد مقالات مروری بسیار محدود است. هدف از این مقاله مروری، بررسی مطالعات انجام شده بر مواد مختلف به روش نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر برای بررسی اثر متغیرهای فرایند بر خواص مکانیکی مواد مانند استحکام کششی و تسلیم، انعطاف‌پذیری و سختی در این مواد است. در انتها با بررسی نتایج، تعداد پاس مطلوب را برای دستیابی به بهترین خواص مکانیکی در ورق‌ها با توجه به ساختار بلوری مواد، با حذف هزینه‌های ناشی از افزایش تعداد پاس بیان خواهیم کرد. همچنین با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، پیشنهاداتی در جهت تسریع روند صنعتی شدن فرایند ECAR و پر کردن خلأهای موجود ارائه شده است. بررسی ۵۰ گزارش علمی منتشر شده به زبان انگلیسی در ۲۰ سال گذشته، به طور خاص در رابطه با نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر، نشان دهنده توجه بیشتر پژوهشگران ایرانی به فرایند ECAR است (شکل ۲). گر چه با توجه به گستردگی پژوهش در زمینه فرایند ECAP این اعداد متفاوت خواهد بود.



شکل ۲ مقالات چاپ شده از پژوهشگران کشورهای مختلف در رابطه با فرایند ECAR

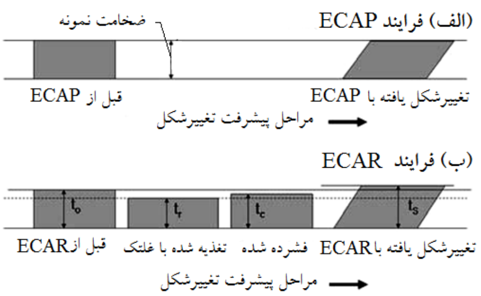
فرایند نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر

فرایند نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر، با افزودن غلتک‌های نورد به فرایند ECAP طراحی شد تا با رفع مشکل ناپیوسته بودن روش قبلی ساختار فوق ریز به صورت پیوسته را با اعمال تغییر شکل برشی در تسمه‌های فلزی ایجاد کند [22]. شکل (۳) شماتیکی از این فرایند را نشان می‌دهد.



شکل ۳ شماتیکی از دستگاه ECAR [18]

در قالب ECAR، Φ (زاویه تقاطع کانال‌ها) معمولاً ۱۲۰ درجه و Ψ (زاویه انحنای قالب) صفر درجه هستند. اصطکاک بین غلتک‌ها و ورق فلزی نیروی مورد نیاز ECAR را تولید می‌کند. حداکثر نیروی تغذیه کننده با نسبت کاهش ممکن در ضخامت ورق، سطح تماس و ضریب اصطکاک بین غلتک‌ها و ورق، محدود شده است. برای کاهش اصطکاک قالب و مقاومت به تغییر شکل طی فرایند ECAR، سطح مقطع در کانال خروجی کمی بزرگ‌تر از کانال ورودی طراحی شده است. در حین نورد ضخامت کم می‌شود و سپس با عبور از منطقه تغییر شکل در محل اتصال دو کانال، ضخامت افزایش می‌یابد. شکل (۴) تغییر در ضخامت را طی فرایند ECAR نشان می‌دهد. ورق تغییر شکل یافته با ECAR، کشش، فشار و تغییر شکل برشی را به طور پیوسته در یک پاس تجربه می‌کند [23,24].



شکل ۴ تغییر ضخامت در فرایندهای (الف)ECAP و (ب)ECAR در یک پاس [24]

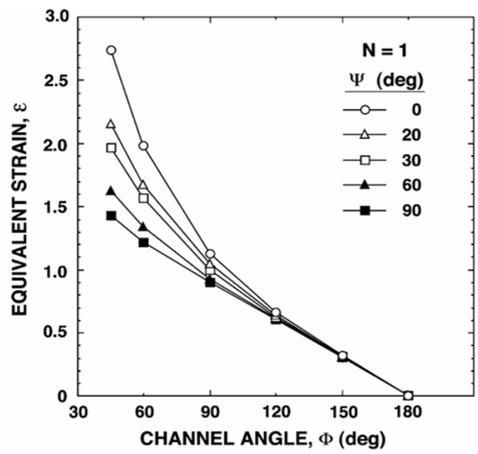
ایواهاشی و همکاران [25] کرنش مؤثر کل در فرایند ECAP را صرف نظر از اصطکاک، با توجه به زاویه تقاطع دو کانال Φ و زاویه انحنا Ψ به شکل رابطه (۱) محاسبه کردند. در این رابطه N بیانگر تعداد تکرار پاس در فرایند است. در صورت مشخص نبودن زاویه انحنا می‌توان به کمک رابطه (۲) کرنش را بر اساس متغیرهای هندسی مانند شعاع تقاطع و قطر کانال محاسبه کرد [26]. ولی استفاده از این رابطه برای فرایند ECAR به این شکل ممکن نیست زیرا در فرایند ECAR کانال‌های ورودی و خروجی با اندازه سطح مقطع‌های متفاوت وجود دارند که بر مقدار کرنش کل مؤثر است. بنابراین رابطه (۱) توسط لی و همکاران [8] به شکل رابطه (۳) اصلاح شد که کرنش مؤثر کل در فرایند ECAR با توجه به نسبت ضخامت کانال‌ها (K) محاسبه می‌شود. پارامتر K معادل نسبت ضخامت کانال ورودی به ضخامت کانال خروجی است. مقادیر پیش‌بینی شده به کمک این رابطه بسیار نزدیک به مقادیر حاصل از بررسی‌های تجربی است [27].

$$\varepsilon_N = N\left\{\frac{2\cot(\Phi/2+\Psi/2)+\Psi\csc(\Phi/2+\Psi/2)}{\sqrt{3}}\right\} \quad (۱)$$

$$\tan\left(\frac{\Psi}{2}\right) = \frac{0.5\,R\sin(\Phi)}{L_0 - R\cos^2\left(\frac{\Phi}{2}\right)} \quad (۲)$$

$$\varepsilon_N = NK^2\left\{\frac{2\cot(\Phi/2+\Psi/2)+\Psi\csc(\Phi/2+\Psi/2)}{\sqrt{3}}\right\} \quad (۳)$$

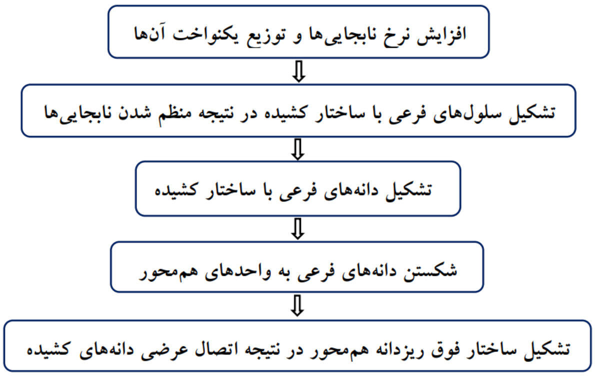
با توجه به رابطه (۳)، کرنش مؤثر در هر پاس از فرایند ECAR، با افزایش در زاویه قالب کاهش می‌یابد. ساختار فوق‌ریزدانه (UFG) زمانی حاصل می‌شود که کرنش تجمع‌یافته در نمونه به سطح بحرانی مشخصی برسد. این سطح بحرانی کرنش، به زاویه کانال بستگی دارد و با افزایش در زاویه کانال افزایش می‌یابد. شکل (۵) نشان می‌دهد که افزایش در زاویه تقاطع کانال‌ها منجر به کاهش کرنش معادل در یک پاس فرایند می‌شود و بنابراین برای دستیابی به کرنش بحرانی برای تشکیل ساختار فوق‌ریزدانه به تعداد پاس بیشتری از فرایند نیاز است. مقدار کرنش بحرانی برای دستیابی به ساختار UFG در فرایند ECAR با زاویه انحنای صفر درجه و با زاویه کانال ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۰ و ۱۴۰ به ترتیب برابر با ۲/۱، ۲/۹، ۳/۸ و ۴/۴ است. کرنش تجمعی اعمال شده تنها عامل مؤثر بر تشکیل ساختار UFG در فلزات نیست و ضروری است که حد کرنش اعمال شده به نمونه در هر پاس نیز بیش از یک مقدار مشخص باشد [8]. شکل (۵) اهمیت زاویه تقاطع دو کانال Φ و زاویه انحنا Ψ بر کرنش معادل در هر پاس از فرایند ECAP را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) می‌توان دریافت که تغییر در زاویه انحنا (Ψ) در محدوده زاویه تقاطع (Φ) ۹۰ تا ۱۸۰ درجه تأثیر نامحسوسی بر کرنش معادل دارد همچنین حداکثر مقدار کرنش در یک پاس از فرایند زمانی حاصل می‌شود که هر دو زاویه تقاطع کانال‌ها و انحنا در حداقل مقدار انتخاب شوند. بنابراین با انتخاب زاویه کوچک‌تری از کانال می‌توان با تعداد پاس کمتری از فرایند ECAR به کرنش بیشتر و ساختار فوق ریزدانه رسید [28].



شکل ۵ تغییر کرنش معادل پس از یک پاس فرایند ECAP با تغییر در زاویه بین دو کانال و زاویه انحنای قالب [28]

خواص مکانیکی مواد بر اثر فرایند ECAR

در فرایند ECAR، مواد با عبور از زاویه بین کانال‌ها، تحت کرنش بالا قرار گرفته و ساختار و خواص مکانیکی تحت تأثیر این کرنش تغییر می‌کنند. بر اساس مطالعات انجام شده فرایند ECAR می‌تواند با کوچک کردن اندازه دانه‌ها در ساختار و افزایش دانسیته نابه‌جایی‌ها منجر به بهبود خواص مکانیکی در فلزات و آلیاژها شود. برای دستیابی به ساختار فوق ریزدانه در فلزات تحت فرایند ECAR، پنج مرحله مورد نیاز است که در شکل (۶) نشان داده شده است [6].

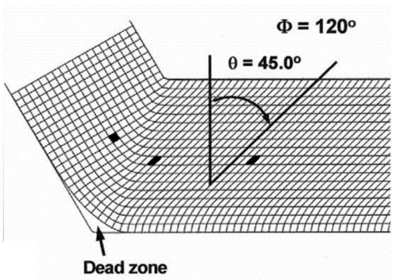


شکل ۶ مراحل متوالی تشکیل ساختار فوق ریزدانه در فرایند ECAR

بر اساس رابطه هال ـ پچ، ریز شدن ساختار باعث افزایش استحکام در مواد می‌شود، در حالی که در مواد نانوکریستالی با اندازه دانه کوچک‌تر از ۲۵ nm روند تغییر در رابطه هال ـ پچ معکوس می‌شود [29]. نتایج آزمون کشش در دمای اتاق پس از تکرار فرایند ECAR در چند پاس، برای فلزات و آلیاژهایی با ساختار FCC و BCC افزایش در استحکام تسلیم و کششی و کاهش در انعطاف‌پذیری را نشان می‌دهد در حالی که برای آلیاژهای HCP نتایج گزارش شده روند تغییرات متفاوتی در خواص مکانیکی را نشان می‌دهد که در ادامه به تفصیل بیان می‌شود.

گزارش‌های ارائه شده توسط پژوهشگران نشان داده است که فرایند ECAR می‌تواند منجر به تولید ساختار ناهمگن با خواص مکانیکی خوب در انواع متفاوتی از مواد مانند آلومینیم [30]، فولاد ضدزنگ [31] و تیتانیوم [32] شود. بررسی ضخامت نمونه نشان دهنده توزیع کرنش‌های بالاتر در مناطق همجوار با لبه ورق نسبت به مرکز آن است. ناهمگنی در مواد پس از فرایند ECAR، نشان دهنده تمرکز نابه‌جایی بیشتر و کاهش بیشتر در

اندازه‌دانه در لبه‌های ورق در مقایسه با مرکز آن است [33]. در فولاد ضدزنگ ناهمگنی در مقطع ورق به این صورت است که پس از فرایند در مناطق نزدیک‌تر به لبه، استحاله مارتنزینی بیشتر از مرکز آن است [31]. با توجه به اینکه برش ساده شکل غالب تغییر شکل در فرایند ECAR است، این تغییر شکل برشی به استثنای مناطق نزدیک به سطح پایینی قطعه، تقریباً در ضخامت قطعه یکنواخت است. این ناهمگنی در نزدیکی سطح پایینی به علت حضور منطقه مرده است که در شکل (۷) با پیکان نشان داده شده است [8].



شکل ۷ الگوی تغییر شکل برشی نمونه تحت فرایند ECAR با زاویه قالب ۱۲۰° [8]

خواص مکانیکی در فلزات با ساختار FCC و BCC پس از ECAR

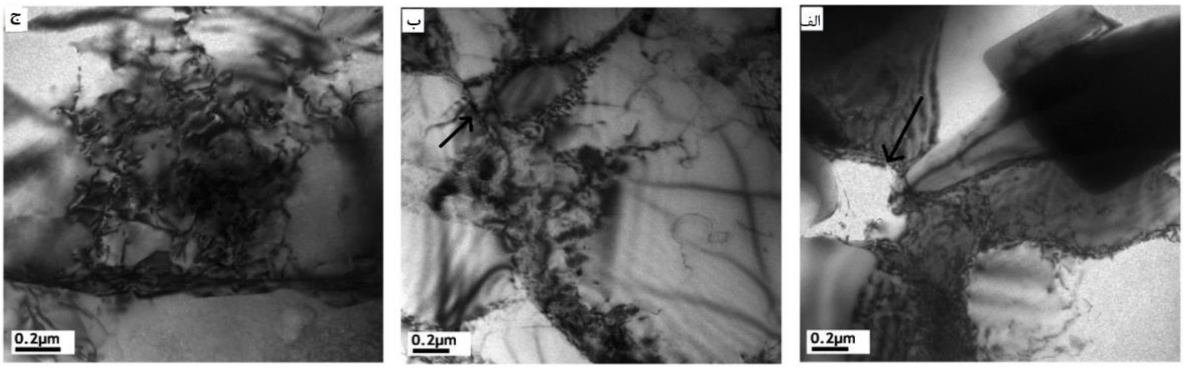
فلزات و آلیاژهایی با ساختار بلوری FCC و BCC، فلزاتی با قابلیت تغییر شکل خوب هستند و تحت فرایند ECAR، می‌توانند به سادگی با تکرار تعداد پاس، کرنش‌های بالایی را تحمل کنند. فرایند ECAR در ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیم ۵۰۳۸ منجر به بهبود خواص مکانیکی شده است. این آلیاژ با افزودن منیزیم به آلومینیم تشکیل شده و مشابه با آلومینیم ساختار بلوری FCC دارد. طبق گزارش ارائه شده توسط نعمتی چاری و همکاران [34] پس از اولین پاس فرایند، استحکام کششی از ۳۳۰ MPa به ۳۷۲ MPa و استحکام تسلیم از ۱۷۸ MPa به ۳۱۴ MPa افزایش یافته و در مقابل ازدیاد طول از ۱۳/۵٪ به ۸٪ کاهش پیدا می‌کند. با ادامه فرایند بین پاس اول تا سوم افزایش جزئی در خواص استحکامی مشاهده می‌شود که پس از پاس سوم تقریباً بدون تغییر باقی می‌مانند. مقایسه خواص مکانیکی بین دو مسیر A و C برای آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳، افزایش کمی در خواص استحکامی و میکروسختی در مسیر C را نشان می‌دهد که به علت توزیع یکنواخت‌تر کرنش پلاستیک در مسیر C نسبت به مسیر A است.

آنیل نمونه‌ها قبل از فرایند ECAR افزایش ناچیزی در مقدار استحکام تسلیم و کششی و نیز میکروسختی نشان می‌دهد. همچنین آنیل پس از فرایند ECAR در هر دو دمای ۲۰۰ °C و ۳۰۰ °C به مدت یک ساعت، منجر به کاهش خواص استحکامی و میکروسختی و افزایش در ازدیاد طول می‌شود. نتایج ارائه شده توسط بزچلویی و همکاران [14] نیز این روند تغییر در خواص آلیاژ آلومینیم ۵۰۳۸ را تأیید می‌کند و حداکثر مقدار استحکام تسلیم، کششی و میکروسختی در پاس سوم را به ترتیب ۲۸۴ MPa و ۳۸۰ MPa و ۱۱۹ H_V گزارش کرده است.

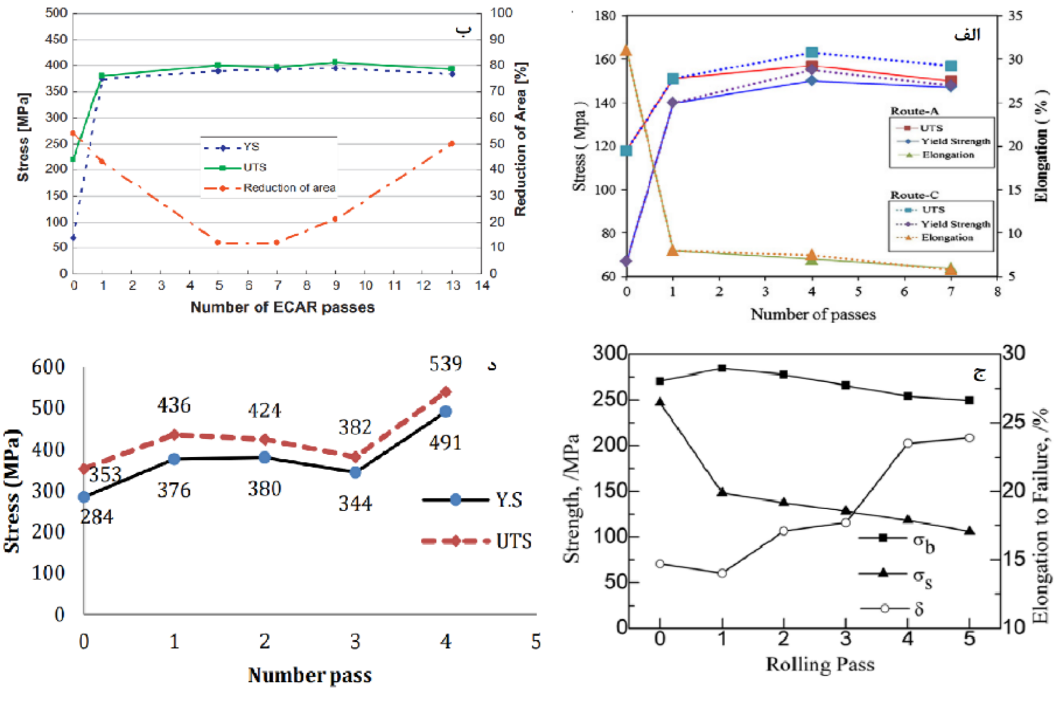
گزارش‌های ارائه شده در بررسی اثر تعداد پاس فرایند ECAR بر خواص مکانیکی دیگر آلیاژهای آلومینیم نیز این روند تغییرات را تأیید می‌کنند. نم و همکاران [35] با بررسی تغییرات اندازه و شکل رسوبات $MgZn_2$ و Al_3Zr در آلیاژ آلومینیم ۷۰۵۰ افزایش میکروسختی را پس از دو پاس فرایند از ۶۰ H_V تا ۱۰۰ H_V نشان دادند. فرایند ECAR منجر به کاهش اندازه رسوبات با شکستن آن‌ها همزمان با کاهش اندازه دانه می‌شود. فرایند ECAR بر روی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ با ساختار بلوری FCC نیز افزایش قابل توجه سختی و استحکام تسلیم را در پاس اول و دوم نشان داده است [36]. افزایش دانسیته نابه‌جایی‌ها و تشکیل ساختار فوق‌ریزدانه دلیل این افزایش ناگهانی در خواص مکانیکی است. شکل (۸) تغییر در ریزساختار را با افزایش تعداد پاس در این آلیاژ نشان می‌دهد. پس از یک پاس فرایند، ساختار سلولی با ابعاد بین ۵۰ تا ۳۰۰ نانومتر درون دانه‌های بزرگ‌تر تشکیل می‌شود که با پیکان سیاه در شکل (۸ ـ الف) نشان داده شده است. نمونه پس از دو پاس فرایند از نظر اندازه دانه مشابه با پاس اول است با این تفاوت که تعداد دانه‌های فوق‌ریز متشکل از سلول‌های فرعی بیشتر است (شکل ۸ ـ ب). در پاس پنجم به علت تشکیل حلقه‌های نابه‌جایی درهم پیچیده تشخیص ساختار دانه‌ها مشکل می‌شود (شکل ۸ ـ ج). بنابراین مراحل تشکیل ساختار فوق ریزدانه عبارت از تشکیل سلول‌های نابه‌جایی سپس دیواره‌های نابه‌جایی چندضلعی در مقادیر کرنش بیشتر، تبدیل این دیواره‌ها به مرز و تشکیل ساختار فوق ریزدانه در مواد است. اشباع سختی پس از دو پاس به علت فرایند نرم شدن است که در نتیجه حذف نابه‌جایی‌ها در دانه‌های فرعی است. مسیر فرایند تأثیر قابل توجهی بر افزایش ۶۵ درصدی استحکام تسلیم ندارد [36].

عظیمی و همکاران [37] نشان دادند یک پاس فرایند ECAR بر روی آلیاژ آلومینیم 1100-O استحکام تسلیم را از ۶۷ MPa تا ۱۴۰ MPa و استحکام کششی را از ۱۱۶ MPa تا ۱۵۱ MPa افزایش می‌دهد در حالی که انعطاف‌پذیری از ۳۱ درصد به ۸ درصد کاهش می‌یابد. افزایش استحکام تا پاس چهارم ادامه دارد و به مقدار ۱۵۰MPa برای استحکام تسلیم و ۱۵۷ MPa برای استحکام کششی می‌رسد. تکرار بیش از ۴ پاس منجر به کاهش استحکام در آلومینیم 1100-O می‌شود در حالی که انعطاف‌پذیری همچنان کاهش می‌یابد. جزئیات تغییر در استحکام و انعطاف‌پذیری با تکرار تعداد پاس تا پاس هفتم در دو مسیر A و C در شکل (۹ ـ الف) نشان داده شده است. افزایش شدید در میکروسختی پس از پاس اول مشاهده می‌شود.

بررسی اثر آنیل بر رفتار آلیاژهای آلومینیم نشان می‌دهد که عملیات آنیل کردن باعث افزایش در اندازه دانه و کاهش خواص مکانیکی می‌شود. حتی اگر پس از عملیات آنیل‌کردن، فرایند ECAR انجام شود، اندازه‌دانه پس از پاس اول، نسبت به نمونه بدون آنیل عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد [40].



شکل ۸ تصاویر TEM از آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ پس از (الف) یک پاس، (ب) دوپاس و (ج) ۵ پاس فرایند ECAR [36]



شکل ۹ تغییرات استحکام کششی، تسلیم و ازدیاد طول در نمونه‌های: (الف)آلیاژ آلومینیم 1100-O [37]، (ب) مس خالص [38]، (ج) تیتانیوم خالص [39] و (د)آلیاژ منیزیم AZ31 [16]

بررسی تغییر در خواص مکانیکی با تکرار پاس در فرایند ECAR در نمونه‌هایی از جنس مس خالص نیز مانند آلیاژهای آلومینیم افزایش در استحکام و میکروسختی و کاهش در انعطاف‌پذیری را نشان می‌دهد. کواکاج و همکاران [38] از فرایند ECAR برای بررسی خواص مکانیکی مس خالص با هدایت الکتریکی بالا استفاده و مشاهده کردند که حداکثر مقدار افزایش در استحکام تسلیم و کششی در پاس اول اتفاق افتاده است و تقریباً به عدد ۳۷۰ MPa برای هر دو استحکام می‌رسد. سپس تا پاس پنجم استحکام با سرعت کمی افزایش یافته است و پس از آن تغییرات جزئی در استحکام با افزایش در تعداد پاس‌ها مشاهده می‌شود. در این نمونه، حداکثر مقدار استحکام ۴۱۰ MPa در پاس نهم مشاهده می‌شود. روند کاهش سریع در مقدار کاهش سطح مقطع از ۵۴٪ تا ۱۲٪ تا پاس پنجم و پس از آن حالت پایدار بین پاس ۵ تا ۷ مشاهده می‌شود. متعاقباً ادامه دادن تعداد پاس‌های فرایند منجر به افزایش در مقدار کاهش سطح مقطع تا ۵۰٪ می‌شود که در پاس ۱۳ اتفاق می‌افتد. شکل (۹ ـ ب) جزئیات این تغییر را نشان می‌دهد. در این گزارش میکروسختی نیز روندی مشابه با استحکام نشان می‌دهد. حداکثر افزایش در میکروسختی در آغاز فرایند ECAR تا پاس پنجم مربوط به کرنش سختی است که از مقدار ۱۱۷ H_v به ۱۳۲ H_v می‌رسد و ادامه پاس‌ها منجر به افزایش قابل توجهی در میکروسختی نمی‌شود، طوری که پس از پاس پنجم کاهش جزئی در مقدار میکروسختی مشاهده می‌شود. کواکاج و همکاران فرایند ECAR را بر روی نمونه مسی تا ۳۳ پاس ادامه دادند و مشاهده کردند که در ادامه مسیر خواص مکانیکی کاهش یافته و اشباع در استحکام در پاس پنجم رخ داده است. این اشباع در استحکام به علت افزایش در دانسیته نابه‌جایی‌هاست که نقش اساسی در استحکام‌دهی ایفا می‌کند [41].

فولاد کم‌کربن (St 12) نیز مانند سایر فلزات نرم، پس از یک پاس فرایند ECAR افزایش قابل توجهی در استحکام تسلیم و کششی به ترتیب از ۱۵۷ MPa تا ۲۷۳ MPa و از ۳۷۵ MPa تا ۳۸۶ MPa نشان می‌دهد. این افزایش استحکام با کاهش ۴۰ درصدی انعطاف‌پذیری همراه است [42].

بر اساس گزارش‌های قبلی ارائه شده [18] برای مس خالص پس از ۱۰ پاس فرایند ECAR، روند تغییر استحکام و انعطاف‌پذیری با افزایش تعداد پاس را برای فلزات نرمی مانند مس و آلومینیم و فولاد کم‌کربن می‌توان به سه منطقه تقسیم کرد که در ادامه این سه منطقه برای فلز مس خالص بیان شده و برای سایر فلزات نرم قابل تعمیم است:

منطقه ۱: افزایش شدید در استحکام تسلیم و کششی و کاهش قابل توجه در ازدیاد طول در ۳ پاس اول که می‌تواند به علت افزایش ناگهانی نابه‌جایی‌ها در ساختار باشد. در این زمان نابه‌جایی‌ها شروع به در هم پیچیده شدن می‌کنند و ساختارهای سلولی با نابه‌جایی‌های داخلی زیاد تشکیل می‌دهند. کرنش سختی به وسیله تولید نابه‌جایی، حرکت و برخورد آن‌ها فرایند غالب در این منطقه است و در افزایش ۱۵۰ درصدی استحکام تسلیم و ۲۵ درصدی استحکام کششی برای نمونه مسی سهیم است. در همین زمان دانه‌ها شکسته شده و دانه‌های فرعی نیز تشکیل شده‌اند که با توجه به رابطه هال ـ پچ باعث افزایش استحکام می‌شود. زاویه عدم تطابق در این منطقه کمتر از ۲ درجه است که تأیید کننده تشکیل سلول با دانه‌های فرعی است [18]. در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر مس دانه درشت اولیه، نابه‌جایی در درون دانه‌ها و مرزها تشکیل می‌شود [43]. ازدیاد طول پس از سه پاس فرایند در نمونه مس خالص ۶۷٪ کاهش و میکروسختی در حدود ۷۰ درصد افزایش می‌یابد [18].

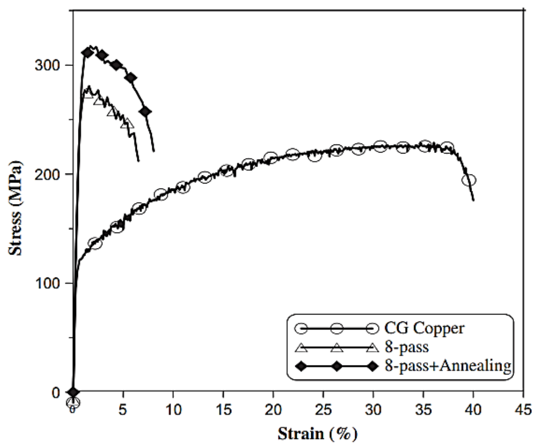
منطقه ۲: افزایش در استحکام تسلیم و کششی و نیز کاهش در ازدیاد طول با شیب بسیار کمی تا پاس هفتم ادامه می‌یابد. دانه‌های فوق‌ریز با مرزهای بزرگ‌زاویه مانع حرکت نابه‌جایی‌ها می‌شوند و استحکام را به میزان بسیار کمی بهبود می‌بخشند. در همین زمان این دانه‌ها ممکن است مکانیزم‌های دیگر تغییر شکل مانند لغزش مرزدانه‌ای و چرخش دانه‌ها را آسان کنند و از کاهش شدید در انعطاف‌پذیری بکاهند [43]. در پاس هفتم که مرز بین منطقه کارسختی و کارنرمی است، سلول‌ها با نوع جدیدی از مرز تشکیل می‌شوند. مرزهای سلول به تدریج به مرزهای نازک‌تر و منظم‌تر تبدیل می‌شوند. اگرچه دانسیته نابه‌جایی‌های داخلی کاهش می‌یابد ولی همچنان تعدادی نابه‌جایی داخلی وجود دارد [44].

منطقه ۳: با افزایش بیشتر تعداد پاس، بعد از پاس هفتم کاهش کمی در نمودار استحکام تسلیم و کششی مشاهده می‌شود ولی این کاهش، افزایشی در ازدیاد طول را به همراه ندارد و ازدیاد طول به طور جزئی به روند کاهشی ادامه می‌دهد به طوری که می‌توان گفت ازدیاد طول پس از پاس سوم تقریباً ثابت است. با

افزایش کرنش پلاستیک تجمعی، تولید و از بین رفتن نابه‌جایی‌ها به تعادل دینامیکی می‌رسند و اندازه دانه به حداقل می‌رسد و کوچک‌تر نمی‌شود. بنابراین، به این منطقه که استحکام تمایل به کاهش دارد، منطقه کارنرمی گفته می‌شود. در این منطقه دانه‌های بسیار ریز با مرزهای نازک و منظم و زاویه عدم تطابق بالا وجود دارند [44]. درشت شدن نابه‌جایی‌ها، کاهش دانسیته آن‌ها، از بین رفتن نابه‌جایی‌ها در مرزدانه‌ها و یا بازیابی دینامیکی باعث کارنرمی در مواد می‌شوند. این در صورتی رخ می‌دهد که مقدار زیاد نابه‌جایی قبل از کرنش‌نرمی وجود داشته باشد [45]. بازیابی دینامیکی در دمای اتاق در مواد نانوکریستالی رایج است [46].

مقایسه مقادیر استحکام در دو مسیر A و C برای نمونه مس خالص، کمتر بودن استحکام در مسیر A را نشان می‌دهد که می‌تواند به علت توزیع نایکنواخت کرنش، جهت‌دار بودن دانه‌ها و کشیدگی آن‌ها در راستای اعمال نیرو در آزمون کشش باشد [47]. تحقیقات انجام شده در فرایند ECAP نیز کمتر بودن استحکام در مسیری که دانه‌های کشیده‌تری ایجاد می‌کند را تأیید می‌کند [48,49]. عملیات حرارتی در دمای کمتر از دمای تبلور مجدد به مدت ۲۰ دقیقه بر نمونه‌های مس خالص پس از ۸ پاس فرایند ECAR بهبود در خواص مکانیکی را نشان داده است. شکل (۱۰) اثر عملیات حرارتی پس از ECAR را برای نمونه مس خالص نشان می‌دهد. مقدار افزایش در استحکام نهایی پس از آنیل در حدود ۵۰ MPa است که با افزایش ۲ درصدی در ازدیاد طول همراه است. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین عیوب در فرایند ECAR کاهش کارسختی با تکرار پاس‌های فرایند است، می‌توان گفت آنیل نمونه پس از ECAR زیر دمای تبلور مجدد می‌تواند باعث افزایش جزئی کارسختی در نمونه شود. کاهش جزئی در اندازه دانه باعث افزایش استحکام می‌شود در حالی که منظم شدن نابه‌جایی‌ها در اثر تبلور مجدد جزئی، مهم‌ترین عامل بهبود در ازدیاد طول است [50].

مواد با ساختار فوق‌ریز و نانوکریستالی اغلب انعطاف‌پذیری کمی دارند و مقادیر بسیار کمی ازدیاد طول را در تست کشش نشان می‌دهند. این مقادیر کم انعطاف‌پذیری گاهی اوقات به عیوبی مانند تخلخل مربوط می‌شود که می‌تواند در اثر ایجاد ساختار نانو به صورت حجمی باشد. نشان داده شده است که نانوساختار ایجاد شده توسط فرایند ECAR در فلزات نرمی مانند مس و آلیاژهای آلومینیم با حداقل عیوب می‌تواند به طور همزمان استحکام بالا و انعطاف‌پذیری مناسبی داشته باشد. یک دلیل مهم دیگر برای انعطاف‌پذیری کم در مواد با ساختار نانو، عدم توانایی آن‌ها برای سخت شدن در حین تغییر شکل پلاستیک شدید است که معمولاً برای بهبود انعطاف‌پذیری مورد نیاز است. دست‌کاری جزئی در فرایند ممکن است در اثر ذخیره‌سازی نابه‌جایی، نرخ سخت شدن را افزایش دهد و بنابراین منجر به بهبود انعطاف‌پذیری شود [51].



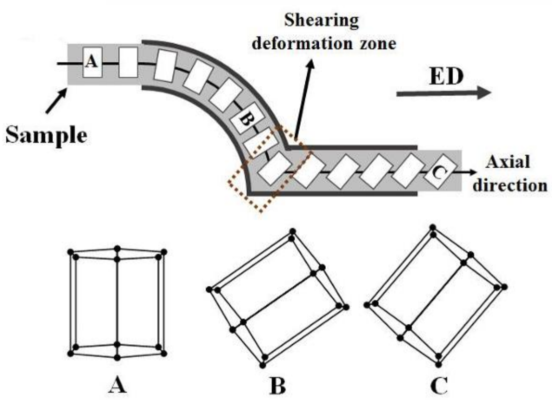
شکل ۱۰ نتایج آزمون کشش مس خالص درشت‌دانه، نمونه‌های مس ۸ پاس فرایند ECAR شده با و بدون عملیات حرارتی بعدی [46]

خواص مکانیکی در فلزات با ساختار HCP پس از ECAR

روند تغییرات در خواص مکانیکی در فلزاتی مانند آلیاژهای منیزیم با ساختار بلوری HCP تا حدودی متفاوت از ساختارهای FCC است. با توجه به مشکل بودن فرایند تغییر شکل در این فلزات، عملیات حرارتی حین فرایند ECAR ضروری است و دمای گرم‌کردن و نرخ سردکردن نمونه‌ها تأثیر زیادی بر نتایج حاصل دارد. حسنی و همکاران [52] ارتباط خواص مکانیکی را با تعداد پاس‌های فرایند ECAR در آلیاژ منیزیم AZ31 بررسی کردند. ورق قبل از هر پاس سه دقیقه پیش‌گرم می‌شود. دمای پیش‌گرم در پاس اول ۳۶۰°C ذکر شده است که در پاس‌های بعدی کاهش می‌یابد به طوری که در پاس دهم به ۱۶۰°C می‌رسد. آزمون کشش، کاهش در استحکام تسلیم از ۱۸۰ MPa در نمونه آنیل شده اولیه به ۱۱/۶ MPa در پاس دهم و همچنین کاهش استحکام کششی از ۲۲۵ MPa به ۱۰۸ MPa را پس از ۱۰

پاس نشان می‌دهد در حالی که درصد ازدیاد طول بهبود می‌یابد و از حدود ۱۳٪ درصد به ۷۹٪ می‌رسد. مشاهده می‌شود که نتایج مربوط به آلیاژ منیزیم با سایر فلزات متفاوت است که می‌تواند به دلیل فعال‌سازی صفحات لغزش همراه با تشکیل دانه‌هایی در ابعاد نانومتری و یا فوق‌ریزدانه با حضور دوقلویی‌های مکانیکی فراوان در ساختار باشد. علی‌رغم کاهش در استحکام با افزایش در تعداد پاس، بهبود پیوسته در میکروسختی مشاهده شده است طوری که پس از ۸ پاس ۵۳٪ افزایش در میکروسختی گزارش شده است. اشباع در میکروسختی پس از پاس هشتم می‌تواند به علت اشباع کرنش در پاس‌های بالا باشد. این روند تغییر در خواص مکانیکی در آلیاژ منیزیم AZ31 توسط پژوهشگران دیگری نیز گزارش شده است [53,54]، با این تفاوت که میکروسختی نیز مانند استحکام پس از انجام فرایند ECAR روند کاهشی نشان داده است [54]. در گزارش ارائه شده توسط پنگ و همکاران [54] با انجام تنها یک پاس فرایند، استحکام تسلیم از مقدار اولیه ۲۰۷ MPa به حدود ۸۰ MPa رسیده است در حالی که نمونه منیزیم AZ31 کاهش جزئی در استحکام کششی را تجربه می‌کند و انعطاف‌پذیری از مقدار اولیه ۱۵درصد به ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. در این گزارش بیان شده است که با وجود ریز شدن دانه‌ها میکروسختی افزایش نمی‌یابد و کاهش جزئی را نشان می‌دهد که می‌تواند به علت تأثیر بیشتر جهات کریستالی در تغییرات میکروسختی باشد. شکل (۱۱) به صورت شماتیک تغییر جهت کریستالی در مواد با ساختار HCP را در فرایند ECAR نشان می‌دهد. قبل از ورود به منطقه تغییر شکل برشی، جهت کریستالی تقریباً بدون تغییر است. با عبور از منطقه تغییر شکل برشی، تغییر جهت کریستالی همزمان با تغییر شکل برشی رخ می‌دهد [54].

چن و همکاران [16] با انجام آزمون کشش بر روی نمونه آلیاژ منیزیم AZ31 که پنج پاس تحت فرایند ECAR قرار گرفته است، کاهش در استحکام تسلیم از ۲۵۰ MPa به ۱۰۵ MPa و استحکام کششی از ۲۷۰ MPa به ۲۵۵ MPa را گزارش کرده‌اند. افزایش در ازدیاد طول در این آلیاژ به علت جهت‌گیری کریستالی صفحات است. شکل (۹ ـ ج) روند این تغییرات را نشان می‌دهد. حکیمیان و همکاران [55] افزایش انعطاف‌پذیری از ۹ تا ۱۷ درصد را پس از یک پاس فرایند ECAR در آلیاژ منیزیم AZ31 گزارش کردند. این افزایش در انعطاف‌پذیری با کاهش بیش از ۵۰ درصدی استحکام تسلیم و کششی همراه است. فرایندهای SPD در آلیاژهای منیزیم علاوه بر ریزدانه کردن و بهبود در انعطاف‌پذیری، منجر به رسوب فاز ثانویه و اصلاح در جهات کریستالی نیز می‌شوند. فاز ثانویه رسوب کرده می‌تواند در پاس‌های بالاتر شکسته شود [56].



شکل ۱۱ شماتیک تغییر جهت کریستالی در ساختار HCP در فرایند ECAR [54]

پژوهش در زمینه بررسی تغییر در خواص مکانیکی در فلز تیتانیوم با ساختار HCP با افزایش در تعداد پاس فرایند ECAR محدود است و پژوهشی با زاویه کانال ۱۲۰° در فرایند ECAR برای مقایسه با نتایج سایر فلزات مشاهده نشد. اثر فرایند ECAR بر ورق تیتانیومی با تکرار فرایند در چهار پاس در مسیر C و در دمای محیط توسط هنرپیشه و همکاران [39] بررسی شد و بررسی روند تغییر خواص مکانیکی نشان داد که پس از افزایش شدید در استحکام تسلیم و کششی در پاس اول، نرخ این افزایش در پاس‌های بعدی کم می‌شود و در پاس سوم کاهش در استحکام مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که در این فرایند زاویه تقاطع دو کانال ۱۳۵ درجه و زایه انحنا ۲۰ درجه است. ادامه فرایند منجر به افزایش مجدد در استحکام در پاس چهارم می‌شود. شکل (۹ ـ د) جزئیات این تغییر در استحکام تسلیم و کششی را با ذکر عدد نشان می‌دهد. این روند تغییرات برای سختی نیز تکرار می‌شود. جدول (۲) تعدادی از نتایج حاصل از بررسی فرایند ECAR بر فلزات مختلف را به صورت خلاصه ارائه می‌دهد.

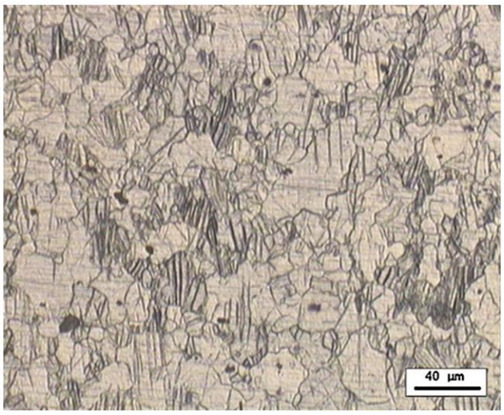
جدول ۲ تعدادی از نتایج حاصل از بررسی خواص مکانیکی برخی فلزات و آلیاژها پس از فرایند ECAR

	نویسنده	آلیاژ	تعداد پاس	نتایج
۱	نعمتی چاری و همکاران [34]	5083 Al	۵	افزایش در میکروسختی در حدود ٪۱۸/۵ در سه پاس اول و کاهش جزئی پس از آن افزایش استحکام تسلیم و کششی به ترتیب برابر با ٪۷۱ و ٪۱۳ در پاس اول و تغییرات بسیار کم با ادامه تعداد پاس‌های فرایند کاهش ۴۰ درصدی در ازدیاد طول پس از پاس اول و تغییرات جزئی با ادامه پاس‌های فرایند
۲	بزچلویی و همکاران [14]	5083 Al	۳	افزایش در میکروسختی در حدود ٪۵۲ پس از سه پاس افزایش در استحکام تسلیم و کششی به ترتیب ٪۹۴ و ٪۱۹ پس از سه پاس اول کاهش ۶۰ درصدی ازدیاد طول پس از سه پاس
۳	کواکاج و همکاران [38]	مس خالص	۱۳	افزایش در میکروسختی در حدود ٪۱۳ پس از ۵ پاس، نرخ افزایش پس از پاس پنجم بسیار کم بود. افزایش در استحکام تسلیم و نهایی کشش به ترتیب معادل ٪۴۷۰ و ٪۷۴ فقط در پاس اول و پس از آن تغییرات بسیار ناچیز بود. کاهش در سطح مقطع در ۷ پاس اول با نرخ بالایی رخ داده ولی پس از آن با رسیدن به پاس ۱۳ تقریباً به مقدار اولیه برگشته است.
۴	حبیبی و همکاران [18]	مس خالص	۱۰	افزایش ۷۰ درصدی در میکروسختی در دو پاس اول و سپس تغییرات جزئی در افزایش میکروسختی با ادامه فرایند در پاس های بالاتر افزایش در استحکام تسلیم و نهایی کشش به ترتیب برابر با ٪۱۴۵ و ٪۲۳ در سه پاس اول مشاهده شد و پس از آن نرخ تغییرات بسیار جزئی بود. کاهش در ازدیاد طول در سه پاس اول ٪۶۷ گزارش شده است.
۵	حسنی و همکاران [52]	AZ31 Mg	۱۰	افزایش در میکروسختی در حدود ٪۵۰ کاهش در استحکام تسلیم و کششی به ترتیب به اندازه ٪۳۷ و ٪۵۲ افزایش در ازدیاد طول از ٪۱۳ در نمونه اولیه تا ٪۷۹ پس از ۱۰ پاس
۶	چن و همکاران [16]	AZ31 Mg	۵	کاهش در استحکام تسلیم و کششی به ترتیب به اندازه ٪۵۸ و ٪ ۵ افزایش در ازدیاد طول از ٪۱۴ در نمونه اولیه تا ٪۲۴ پس از ۵ پاس
۷	هنرپیشه و همکاران [39]	تیتانیم	۴	افزایش در میکروسختی به اندازه ٪۴۰ افزایش در استحکام تسلیم و کششی به ترتیب برابر با ٪۷۲ و ٪۵۲

مواد با ساختار کریستالی HCP و با محدودیت در حالت‌های تغییر شکل مانند آلیاژهای منیزیم و تیتانیم معمولاً در فرایندهای نورد، بافت کریستالی بسیار قوی ایجاد می‌کنند و با تغییر شکل بسیار کمی مواجه می‌شوند که به علت جهت‌گیری صفحات پایه در صفحه ورق است که توانایی مواد برای تطبیق کرنش پلاستیک را محدود می‌کند. بنابراین این ساختارها محدودیت‌های بسیاری در زمان فعال‌سازی سیستم‌های لغزشی دارند. این رفتار استفاده از منابع خارجی انرژی به شکل گرما را برای ساده کردن اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بدون ایجاد ترک ضروری می‌کند [32]. در استفاده از فرایندهای SPD تا حدودی بر این محدودیت غلبه می‌شود و با فوق‌ریزشدن دانه‌ها انعطاف‌پذیری بهبود می‌یابد. علاوه بر کاهش در اندازه دانه، فرایند SPD می‌تواند به وسیله معرفی حالت‌های متفاوتی از تغییر شکل مانند برش، بافت کریستالی را تغییر دهد [7]. گزارش شده است که با فعال شدن مکانیسم برش در فرایند ECAP استحاله فازی در تیتانیم از ساختار هگزاگونال فشرده (HCP) به ساختار بلوری مکعبی با وجوه مرکز پر (FCC) انجام می‌شود [57].

علاوه بر لغزش نابه‌جایی‌ها در مواد HCP، تغییر شکل پلاستیک شدید در این مواد همراه با دوقلویی است. دوقلویی می‌تواند از نوع کششی، فشاری یا تبلور مجدد باشد که به بافت

کریستالوگرافی و نوع تغییر شکل بستگی دارد. بنابراین در فرایند ECAR فعال‌سازی لغزش یا دوقلویی به شدت به شرایط فرایند مانند میزان کرنش اعمالی، دما، نوع آلیاژ، اندازه دانه اولیه و غیره وابسته است [32]. شکل (۱۲) تشکیل دوقلویی در آلیاژ منیزیم AZ31 را پس از شش پاس فرایند ECAR نشان می‌دهد. نتایج نشان داده‌اند که با افزایش دما مقدار دوقلویی افزایش می‌یابد که می‌تواند به علت رشد دانه‌ها و تسریع در مهاجرت مرزدانه‌ها باشد [58].



شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه منیزیم AZ31 پس از شش پاس فرایند ECAR [52]

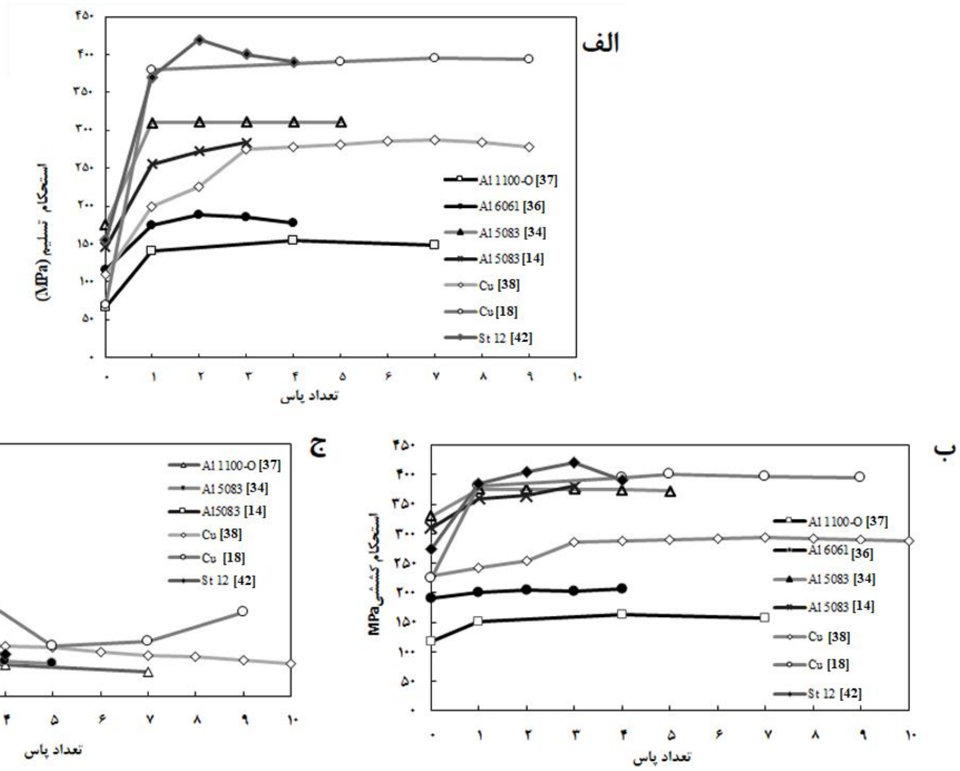
تعداد پاس بهینه فرایند ECAR در دستیابی به بهترین خواص مکانیکی

در مجموع روند تغییر در خواص مکانیکی فلزات و آلیاژهای مختلف در فرایند ECAR مشابه با فرایند ECAP است با این تفاوت که امکان استفاده برای ورق‌ها فراهم شده است. بنابراین محدودیت اصلی فرایند ECAP برای صنعتی شدن یعنی عدم پیوستگی فرایند تا حدودی رفع شده و امکان استفاده از این فرایند SPD در صنعت فراهم شده است. در مقالات مروری و تحقیقاتی مربوط به فرایند ECAP متغیرهای فرایند مانند مسیر فرایند، زاویه قالب، تعداد پاس و دمای عملیات برای تحلیل رفتار مکانیکی و میکروساختار مواد تغییر شکل یافته مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است ولی در رابطه با فرایند ECAR مطالعه مروری که نشان دهنده اثر تعداد پاس بر خواص مکانیکی ورق تغییر شکل یافته باشد، وجود ندارد.

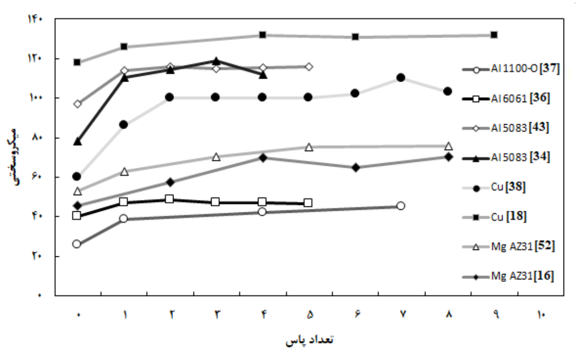
در این مقاله مروری با بررسی مطالعات انجام شده بر فلزاتی از جنس آلومینیم، مس، تیتانیم، فولاد و منیزیم دریافتیم که در فلزاتی با ساختار بلوری FCC و BCC افزایش در تعداد پاس فرایند ECAR منجر به کاهش در اندازه دانه و بهبود در خواص استحکامی می‌شود ولی افزایش بیش از سه پاس از فرایند منطقی به نظر نمی‌رسد. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که در تمام نتایج گزارش شده در فلزات نرمی مانند آلیاژهای آلومینیم، فولاد و مس، تغییر در استحکام تسلیم و کششی در پاس اول قابل توجه است و در پاس‌های دوم تا چهارم به حداکثر مقدار خود می‌رسد. انعطاف‌پذیری در غالب ورق‌های فلزی پس از فرایند ECAR در پاس اول کاهش شدیدی را نشان می‌دهد و با تکرار پاس‌های بیشتر کاهش در انعطاف‌پذیری ادامه می‌یابد. بنابراین افزایش بیش از سه پاس علاوه بر تحمیل هزینه تکرار پاس فرایند ECAR، منجر به افزایش جزئی استحکام و یا حتی کاهش خواص مکانیکی همراه با کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود. در رابطه با فلزاتی مانند آلیاژهای منیزیم با ساختار HCP علی‌رغم ریز شدن دانه‌ها با فرایند ECAR، نحوه تغییر استحکام تسلیم و کششی متفاوت از سایر فلزات است و غالباً با کاهش شدید استحکام تسلیم و کششی همراه است. همچنین فرایند ECAR در این فلزات، منجر به بهبود انعطاف‌پذیری می‌شود [16,55]. با توجه به اینکه انتظار می‌رود استحکام در تیتانیم با ساختار HCP نیز مانند آلیاژهای منیزیم روند کاهشی نشان دهد، افزایش در خواص مکانیکی با تکرار پاس در تنها گزارش ارائه شده نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

در فرایندهای تغییر شکل‌پلاستیک شدید با کانال‌های متقاطع، تغییر شکل مواد فلزی به وسیله دوقلویی و لغزش کنترل می‌شود. به صورت معمول، دوقلویی در مقادیر کمتر کرنش، فرایند غالب است و با افزایش کرنش لغزش نابه‌جایی‌ها عامل اصلی تغییر شکل خواهد بود. با تغییر متغیرهای فرایند مانند دما، تعداد پاس، مسیر فرایند و غیره، مکانیسم غالب تغییر شکل نیز تغییر خواهد کرد. با ریز شدن دانه‌ها تشکیل دوقلویی محدود می‌شود و مکانیسم تغییر شکل از دوقلویی به لغزش نابه‌جایی تغییر می‌کند [20].

بررسی تغییرات سختی در فلزاتی مانند آلیاژهای آلومینیم، منیزیم و مس (شکل ۱۴) نیز تأیید می‌کند که حداکثر مقدار میکروسختی در این فلزات در سه پاس اول فرایند ECAR مشاهده می‌شود و تکرار پاس فرایند بیش از سه پاس، تغییر قابل توجهی را در میکروسختی در اکثر پژوهش‌ها نشان نداده است.



شکل ۱۳ تغییرات: (الف) استحکام تسلیم، (ب) استحکام کششی و (ج) انعطاف‌پذیری با افزایش تعداد پاس فرایند ECAR بر فلزات مختلف



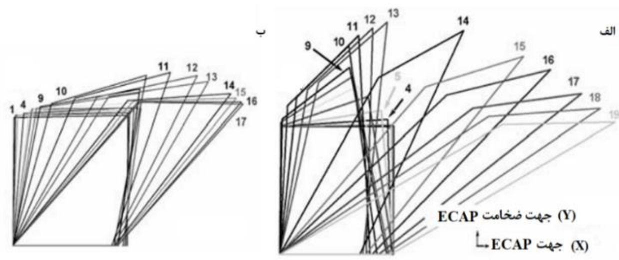
شکل ۱۴ تغییرات میکروسختی با افزایش تعداد پاس در فلزات مختلف

با توجه به اینکه حداکثر افزایش در دانسیته نابه‌جایی‌ها و افزایش استحکام در پاس اول مشاهده می‌شود و در پاس‌های اول تا سوم این روند افزایش استحکام کم می‌شود و در پاس‌های بالاتر (بیش از ۱۰ پاس) حتی با کاهش استحکام همزمان با کاهش انعطاف‌پذیری مواجه خواهیم شد، بنابراین صرف هزینه برای تکرار بیش از سه پاس منطقی نیست.

مقایسه خواص فلزات پس از فرایند ECAP و ECAR

همان طور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، در فرایند ECAR ورق فلزی با کمک اصطکاک سطحی بین غلطک‌ها و ورق، به داخل کانال تغذیه می‌شود و این نیروی تغذیه کننده کافی نیست. بنابراین در طراحی، سطح مقطع کانال خروجی کمی بیشتر از کانال ورودی در نظر گرفته می‌شود تا نیروی اصطکاک را در حین فرایند کاهش دهد. در شکل (۴) نشان داده شد که در یک پاس از فرایند ECAR، ورق فلزی تغییر شکلی شامل کرنش، فشار و برش را تجربه می‌کند. پس در صورت یکسان بودن زاویه تقاطع کانال‌ها در دو فرایند ECAR و ECAP، کرنش مؤثر تجمع یافته کل در فرایند ECAR بسیار بزرگ‌تر از آن چیزی است که با برش به تنهایی در فرایند ECAP حاصل می‌شود [24]. سو و همکاران [59] با استفاده از داده‌های المان محدود نحوه تغییر شکل در یک المان انتخابی از بخش میانی ضخامت یک نمونه را بررسی کردند (این المان در فرایند ECAR در شکل (۷) با رنگ سیاه نشان داده شده است). شکل (۱۵) یک سری از الگوهای تغییر شکل این المان مربعی را پس از یک پاس از فرایندهای ECAP و ECAR نشان می‌دهد. در مقایسه با ECAP، تغییر شکل در فرایند ECAR از تغییر شکل برشی ساده ایدئال منحرف می‌شود

که به دو عامل بستگی دارد. اولین عامل زاویه تقاطع دو کانال است که در فرایند ECAP برابر با ۹۰ درجه و در فرایند ECAR برابر با ۱۲۰ درجه است که منجر به کرنش‌های متفاوت می‌شود و عامل دوم تفاوت در ضخامت کانال ورودی و خروجی در ECAR است که منجر به تغییر در ارتفاع و اعمال فشار می‌شود. امکان کاهش زاویه کمتر از ۱۰۰ درجه در فرایند ECAR وجود ندارد.



شکل ۱۵ تغییر شکل یک المان انتخابی از قسمت میانی ضخامت نمونه تحت فرایندهای: (الف) ECAP با زاویه کانال ۹۰ درجه و (ب) ECAR با زاویه کانال ۱۲۰درجه [59]

مقایسه نتایج مربوط به ریزساختار و خواص مکانیکی در نمونه مس خالص پس از فرایندهای ECAR و ECAP در صورتی که زاویه کانال برابر باشد، تقریباً مقادیر یکسانی را نشان می‌دهد. در هر دو فرایند حداکثر چگالی نابه‌جایی پس از یک پاس در محدوده $۲۱×۱۰^{۱۴}$ m^{-2} و استحکام کششی در حدود ۴۰۰ MPa است [41]. در مقایسه دو فرایند ECAP و ECAR در آلیاژهای آلومینیم، برادوا و همکاران [60] بیان کردند که دستیابی به ساختار فوق‌ریزدانه با سختی بیشتر در فرایند ECAR امکان‌پذیر است. که به دلیل سطح بالای تنش برشی در تغییر شکل با نرخ بالا در یک مرحله، تحرک بالای نابه‌جایی، فعال‌سازی سیستم لغزشی اضافی و افزایش چگالی نابه‌جایی است. خواص مکانیکی پس از ECAR با همان نظم و ترتیب فرایند ECAP تغییر می‌کند که شامل افزایش استحکام و کاهش انعطاف‌پذیری است. بنابراین تمایز اصلی در این دو فرایند در پیوسته بودن فرایند ECAR در مقایسه با ECAP است. در حالی که روند تغییر در خواص مکانیکی در هر دو فرایند تقریباً مشابه است، در زاویه یکسان ازکانال‌ها، در فرایند ECAR کرنش بیشتری در فلز مشاهده می‌شود.

جدول ۳ مقایسه فرایند ECAP با فرایند ECAR [60]

ویژگی	ECAP	ECAR
نرخ کرنش (s^{-1})	$۱۰^{-۲}$	$۱۰^{۴}$–$۱۰^{۵}$
نوع تغییر شکل	برش ساده (تنش‌های مماسی)	فشار پالسی (تنش‌های عمودی)+ برش ساده (تنش‌های مماسی)
تعداد پاس مورد نیاز برای دستیابی به ساختار با اندازه دانه متوسط کمتر از ۵۰۰ نانومتر	۶–۸	۱–۲ (کسر مرزهای بزرگ زاویه بیش از ۵۰ درصد)
ماکروجریان مواد	لایه‌ای آرام	لایه‌ای آرام + متلاطم آشفته
دانسیته نابه‌جایی‌های شبکه (m^{-2})	$۱۰^{۱۰}$–$۱۰^{۱۳}$	$۱۰^{۱۴}$–$۱۰^{۱۵}$
سیستم لغزش (صفحات)	اکتاهدرال	اکتاهدرال + غیراکتاهدرال

نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری بر گزارش‌های ارائه شده در رابطه با خواص مکانیکی مواد پس از فرایند ECAR انجام شد. علی‌رغم مطالعات گسترده و مقالات مروری فراوان در زمینه فرایند ECAP، با توجه به محدودیت‌های فرایند در سازگاری با صنعت، به نظر ادامه انجام پژوهش و صرف هزینه تحقیقاتی در فرایندهایی مانند ECAR که امکان صنعتی شدن دارند، منطقی‌تر باشد. نتایج برای مواد پس از فرایند ECAR، در دو دسته مواد با ساختار FCC و BCC و همچنین مواد با ساختار HCP مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات نشان داد برای فلزاتی مانند آلیاژهای آلومینیم، فولاد و مس استحکام تسلیم و کششی و میکروسختی با افزایش در تعداد پاس‌های فرایند افزایش پیدا می‌کند و انعطاف‌پذیری تا حدودی کاهش می‌یابد. حداکثر مقدار تغییرات در خواص مکانیکی در سه پاس اول مشاهده می‌شود و پس از آن تغییرات بسیار جزئی و یا در برخی موارد با روند معکوس ادامه پیدا می‌کند. همچنین استحکام در مسیر C بیشتر از مسیر A است که به علت چرخش ۱۸۰ درجه‌ای نمونه‌هاست که منجر به کرنش پلاستیک یکنواخت‌تر می‌شود. فرایند ECAR برای آلیاژهای با ساختار HCP علی‌رغم شکل‌پذیری پایین، با استفاده از پیش‌گرم و عملیات حرارتی بین پاس‌ها انجام شده و منجر به ریزدانه شدن

و دستیابی به نانوساختار می‌شود ولیکن تأثیر فرایند ECAR بر خواص مکانیکی فلزات با ساختار HCP مانند آلیاژ منیزیم AZ31 متفاوت است و منجر به بهبود انعطاف‌پذیری در این مواد می‌شود، در حالی که استحکام را کاهش می‌دهد که به علت فعال‌سازی صفحات لغزش و تشکیل دوقلویی‌های فراوان و همچنین تأثیر جهات کریستالی در حین فرایند ECAR در این مواد است. بنابراین می‌توان گفت فرایند ECAR روشی مفید برای اصلاح ساختار و بهبود در خواص مکانیکی مواد است که می‌تواند بدون تغییر در ابعاد نمونه اولیه و با هزینه کم انجام شود و امکان صنعتی شدن را دارد. همچنین با در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به فرایند، با تکرار حداکثر سه پاس از فرایند، می‌توان به خواص مکانیکی مطلوب رسید.

زمینه‌های تحقیقاتی پیشنهادی

۱. نتایج نشان می‌دهدکه عملیات حرارتی پس از فرایند ECAR و یا بین پاس‌ها اثر قابل توجهی بر میکروساختار و خواص مکانیکی به ویژه در آلیاژها با ساختار HCP دارد. با توجه به اینکه پژوهشگران برای افزایش قابلیت شکل‌پذیری در این مواد دماهای مختلف با نرخ سردکردن متنوعی را مورد مطالعه قرارداده‌اند، بنابراین نیاز به مطالعات جامعی در رابطه با عملیات حرارتی قبل و بین پاس‌ها و پس از فرایند، ضروری به نظر می‌رسد.

۲. بررسی تمام متغیرهای فرایند کاری دشوار به نظر می‌رسد و نتایج ممکن است آنچه انتظار می‌رود نباشد، بنابراین در اغلب پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با فرایند ECAR، اثر تعداد پاس و مسیر فرایند بررسی شده و مطالعات محدودی در رابطه با اثر اندازه زاویه بین کانال‌ها و زاویه انحنا صورت پذیرفته است. همچنین بررسی اثر اصطکاک بین قطعه و قالب در فرایند به مطالعات بیشتری نیاز دارد.

۳. بررسی مسیر فرایند نشان داده است که نتایج در مسیر C بهتر و استحکام بیشتر است ولی در مقیاس صنعتی اهمیت مسیر فرایند باید بررسی شود.

۴. پژوهش‌های انجام شده اختلاف ساختار بین قسمت‌های در تماس با قالب (سطح قطعه) و قسمت‌های میانی نمونه را تأیید می‌کند ولی تا کنون در جهت کاهش این اختلاف مطالعه‌ای صورت نپذیرفته است که این مورد در مقیاس صنعتی استفاده از فرایند ECAR اهمیت پیدا می‌کند. اهمیت این اختلاف زمانی مشاهده می‌شود که تکرار پاس در مسیر A صورت پذیرفته باشد که سطح بالا و پایینی قطعه نیز ساختار متفاوتی را نشان خواهند داد. همچنین اختلاف بین سطح و درون قطعه می‌تواند بر خواص خستگی مؤثر باشد. گزارش‌های محدودی در رابطه با بررسی خستگی فلزات پس از فرایند ECAR ارائه شده است که بهبود در رفتار خستگی را در نمونه‌های مس خالص پس از فرایند ECAR تأیید می‌کند [61].

۵. در صورت استفاده صنعتی از فرایند ECAR، بررسی اثر فرایند بر بسیاری دیگر از فلزات و آلیاژها که تا کنون بررسی نشده‌اند، ضروری به نظر می‌رسد. بررسی فرایند ECAR بر خواص کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌تواند منجر به تغییر در مکانیسم‌های غالب ریزدانه شدن شود. برخلاف دیگر نتایج گزارش شده در فلزات و آلیاژها، بهبود استحکام همراه با افزایش در انعطاف‌پذیری در کامپوزیت SiCp/AZ91 پس از دو پاس فرایند ECAR گزارش شده است [62] که لزوم ادامه تحقیقات در این زمینه را تأیید می‌کند.

۶. فرایند ECAR برای تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای فلزی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این زمینه ورق‌های دولایه Al/Cu به کمک این فرایند تولید شده و اثر تعداد پاس بر خواص و ریزساختار آن بررسی شده است [9,63]. در این نمونه‌ها شیب کاهش اندازه‌دانه در لایه‌ها از جنس مختلف، متفاوت خواهد بود.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

تعداد پاس	N

علایم یونانی

زاویه کانال	Φ
زاویه انحنا	Ψ

واژه‌نامه

تغییر شکل پلاستیک شدید	SPD
مواد فوق ریزدانه	UFG
پرس زاویه‌ای با کانال‌های برابر	ECAP

نورد زاویه‌ای با کانال‌های برابر	ECAR	برش نوار محدود شده پیوسته	CCSS
تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد	HPT	پرس زاویه‌ای با کانال‌های نابرابر	DCAP
آهنگری چندگانه	MDF		
پرسکاری شیاری محدود شده	CGP		
اکستروژن پیچشی	TE		
اتصال به روش نورد تجمعی	ARB		

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] C. Wang, et al., "Review on modified and novel techniques of severe plastic deformation," *Science China Technological Sciences*, vol. 55, pp. 2377-2390, 2012. https://doi.org/10.1007/s11431-012-4954-y

[2] K. Kumar, H. Van Swygenhoven, and S. Suresh, "Mechanical behavior of nanocrystalline metals and alloys," *Acta materialia*, vol. 51, no. 19, pp. 5743-5774, 2003. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.08.032

[3] G. Faraji, and H. Kim, "Review of principles and methods of severe plastic deformation for producing ultrafine-grained tubes," *Materials Science and Technology*, vol. 33, no. 8, pp. 905-923, 2017. https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1215064

[4] A. Gupta, B. Chandrasekhar, and K. K. Saxena, "Effect of Equal-channel angular pressing on mechanical properties: An overview," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 5602-5607, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.317

[5] H. Miura, M. Kobayashi, and T. Benjanarasuth, "Effects of strain rate during multi-directional forging on grain refinement and mechanical properties of AZ80Mg alloy," *Materials Transactions*, vol. 57, no. 9, pp. 1418-1423, 2016. https://doi.org/10.2320/matertrans.MH201504

[6] B. Chandrasekhar, et al., "A brief overview of the equal channel angular processing approach," *Materials Today: Proceedings*, 2023. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.356

[7] M. Ciemiorek, M. Orłowska, and M. Lewandowska, "Ultrafine-Grained Plates and Sheets: Processing, Anisotropy and Formability," *Advanced Engineering Materials*, vol. 22, no. 1, pp. 1900666, 2020. https://doi.org/10.1002/adem.201900666

[8] J. C. Lee, H. K. Seok, and J. Y. Suh, "Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing," *Acta Materialia*, vol. 50, no. 16, pp. 4005-4019, 2002. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00200-8

[9] M. Darvishi, M. Morovvati, and A.J. Aghchai, "Effects of equal channel angular rolling process on the mechanical properties of Al-Cu two-layer sheets: experimental and numerical approaches," *Engineering Research Express*, vol. 5, no. 3, pp. 035023, 2023. https://doi.org/10.1088/2631-8695/ace6f5

[10] N. Sadasivan, M. Balasubramanian, and B. Rameshbapu, "A comprehensive review on equal channel angular pressing of bulk metal and sheet metal process methodology and its varied applications," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 59, pp. 698-726, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.032

[11] R. Z. Valiev, and T. G. Langdon, "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain

refinement," *Progress in materials science*, vol. 51, no. 7, pp. 881-981, 2006. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003

[12] J. C. Lee, et al., "Controlling the textures of the metal strips via the continuous confined strip shearing (C2S2) process," *Materials Research Bulletin*, vol. 36, no. 5-6, pp. 997-1004, 2001. https://doi.org/10.1016/S0025-5408(01)00557-8

[13] O. Saray, G. Purcek, and I. Karaman, "Principles of equal-channel angular sheet extrusion (ECASE): application to IF-steel sheets," *Reviews on advanced materials science*, vol. 25, pp. 42-51, 2010.

[14] J. E. Bozcheloei, M. Sedighi, and R. Hashemi, "The effect of temperature on the mechanical properties and forming limit diagram of Al 5083 produced by equal channel angular rolling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 4389-4400, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04586-1

[15] R. Kočiško, et al., "Evaluation of Powder Metallurgy Workpiece Prepared by Equal Channel Angular Rolling," *Materials*, vol. 16, no. 2, pp. 601, 2023. https://doi.org/10.3390/ma16020601

[16] Z. H. Chen, Y. Q. Cheng, and W. J. Xia, "Effect of equal-channel angular rolling pass on microstructure and properties of magnesium alloy sheets," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 22, no. 1, pp. 51-56, 2007. https://doi.org/10.1080/10426910601015907

[17] G. Faraji, and H. Torabzadeh, "An overview on the continuous severe plastic deformation methods," *Materials transactions*, vol. 60, no. 7, pp. 1316-1330, 2019. https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201905

[18] A. Habibi, M. Ketabchi, and M. Eskandarzadeh, "Nano-grained pure copper with high-strength and high-conductivity produced by equal channel angular rolling process," *Journal of Materials processing technology*, vol. 211, no. 6, pp. 1085-1090, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.009

[19] E. Baysal, et al., "An overview of deformation path shapes on equal channel angular pressing", *Metals*, vol. 12, no. 11, pp. 1800, 2022. https://doi.org/10.3390/met12111800

[20] L. Cui, et al., "Recent Advances in the Equal Channel Angular Pressing of Metallic Materials," *Processes*, vol. 10, no. 11, pp. 2181, 2022. https://doi.org/10.3390/pr10112181

[21] S. Prithivirajan, et al., "Recent progress in equal channel angular pressing of magnesium alloys starting from Segal’s idea to advancements till date–A review," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 6, no. 1, pp. 82-107, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.08.001

[22] B.Q. Han, and T.G. Langdon, "Improving the high-temperature mechanical properties of a magnesium alloy by equal-channel angular pressing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 410, pp. 435-438, 2005. https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.084

[23] A. Mashhuriazar, et al., "Finite element analysis and optimization of equal-channel angular rolling process by using Taguchi Methodology," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 32, no. 1, pp. 176-184, 2023. https://doi.org/10.1007/s11665-022-07100-z

[24] Y. H. Chung, J. W. Park, and K. H. Lee, "An analysis of accumulated deformation in the equal channel angular rolling (ECAR) process," *Metals and Materials International*, vol. 12, pp. 289-292, 2006.

https://doi.org/10.1007/BF03027545

[25] Y. Iwahashi, et al., "Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials," *Scripta materialia*, vol. 35, no. 2, 1996. https://doi.org/10.1016/1359-6462(96)00107-8

[26] C. L. Pérez, "On the correct selection of the channel die in ECAP processes," *Scripta Materialia*, vol. 50, no. 3, pp. 387-393, 2004. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2003.10.007

[27] J. H. Han, et al., "Evaluation of formability and planar anisotropy based on textures in aluminum alloys processed by a shear deforming process," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 477, no. 1-2 pp. 107-120, 2008. https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.117

[28] K. Furuno, et al., "Microstructural development in equal-channel angular pressing using a 60 die," *Acta Materialia*, vol. 52, no. 9, pp. 2497-2507, 2004. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.01.040

[29] C. Carlton, and P. Ferreira, "What is behind the inverse Hall–Petch effect in nanocrystalline materials?," *Acta Materialia*, vol. 55, no. 11, pp. 3749-3756, 2007. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.02.021

[30] J. A. Muñoz, M. Avalos, and R. E. Bolmaro, "Heterogeneity of strain path, texture and microstructure evolution of AA6063-T6 processed by Equal Channel Angular Sheet Extrusion (ECASE)," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 768, pp. 349-357, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.216

[31] J. A. Munoz, et al., "Inducing heterogeneity in an austenitic stainless steel by equal channel angular sheet extrusion (ECASE)," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 2473-2479, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.04.013

[32] J. A. Munoz, et al., "Equal channel angular sheet extrusion (ECASE) produces twinning heterogeneity in commercially pure titanium," *Materials Characterization*, vol. 181, p. 111460, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111460

[33] J. A. Muñoz, et al., "Equal channel angular sheet extrusion (ECASE) as a precursor of heterogeneity in an AA6063-T6 alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 3459-3471, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03425-7

[34] R. Nemati Chari, B. Mollaei Dariani, and A. Fallahi Arezodar, "Numerical and experimental studies on deformation behavior of 5083 aluminum alloy strips in equal channel angular rolling," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 232, no. 6, pp. 1031-1043, 2018. https://doi.org/10.1177/0954405416661005

[35] C. Nam, et al., "Effect of precipitates on microstructural evolution of 7050 Al alloy sheet during equal channel angular rolling," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 347, no. 1-2, pp. 253-257, 2003. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00597-X

[36] E. Tan, A. A. Kibar, and C. H. Gür, "Mechanical and microstructural characterization of 6061 aluminum alloy strips severely deformed by Dissimilar Channel Angular Pressing," *Materials Characterization*, vol. 62, no. 4, pp. 391-397, 2011. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.01.016

[37] A. Azimi, et al., "Mechanical properties and microstructural evolution during multi-pass ECAR of Al 1100–O alloy," *Materials & Design*, vol. 42, pp. 388-394, 2012. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.035

[38] T. Kvačkaj, et al., "TEM studies of structure in OFHC copper processed by equal channel angular rolling," *Micron*, vol. 43, no. 6, pp. 720-724, 2012. https://doi.org/10.1016/j.micron.2012.01.003

[39] M. Honarpisheh, and H. Mansouri, "Investigation of Mechanical Properties of Titanium Alloy in the Equal Channel Angular Rolling Process," *I*nternational Conference on Manufacturing Engineering, Iran, 2018.

[40] M. H. Khaled, and A. S. Z. El, "Mechanical characteristics of AL-1050 and Al-6061 alloys deformed using equal channel angular rolling process," *Zastita Materijala*, vol. 63, no. 4, pp. 484-492, 2022. https://doi.org/10.5937/zasmat2204484K

[41] T. Kvackaj, et al., "Microstructure evolution and mechanical performance of copper processed by equal channel angular rolling," *Materials Characterization*, vol. 134, pp. 246-252, 2017. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.10.030

[42] M. Honarpisheh, E. Haghighat, and M. Kotobi, "Investigation of residual stress and mechanical properties of equal channel angular rolled St12 strips," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 232, no. 10, pp. 841-851, 2018. https://doi.org/10.1177/1464420716652436

[43] K. X. Wei, et al., "Microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of industrial Cu–0.5% Cr alloy processed by severe plastic deformation," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 3, pp. 1478-1484, 2011. https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.059

[44] J. C. Lee, J. Y. Shu and J. P. Ahn, "Work-softening behavior of the ultrafine-grained Al alloy processed by high-strain-rate, dissimilar-channel angular pressing," *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 34, pp. 625-632, 2003. https://doi.org/10.1007/s11661-003-0097-x

[45] F. Tang and J.M. Schoenung, "Strain softening in nanocrystalline or ultrafine-grained metals: A mehanistic explanation," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 493, no. 1-2, pp. 101-103, 2008. https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.086

[46] M. A. Meyers, A. Mishra, and D. J. Benson, "Mechanical properties of nanocrystalline materials", *Progress in materials science*, vol. 51. no. 4, pp. 427-556, 2006. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.08.003

[47] A. Habibi, M. Ketabchi, M., Eskandarzadeh. "Microstructure and Properties of Pure Copper Processed by Equal Channel Angular Rolling Process," International Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials, Iran: University of Tehran, 2011.

[48] D. J. Alexander and I. J. Beyerlein, "Anisotropy in mechanical properties of high-purity copper processed by equal channel angular extrusion," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 410, pp. 480-484, 2005. https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.149

[49] S. Dobatkin, et al., "Effect of the route and strain of equal-channel angular pressing on structure and properties of oxygen-free copper," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 462, no. 1-2, pp. 132-138, 2007. https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.156

[50] A. Habibi and M. Ketabchi, "Enhanced properties of nano-grained pure copper by equal channel angular rolling and post-annealing," *Materials & Design*, vol. 34, pp. 483-487, 2012. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.029

[51] S. Shekhar, et al., "Multimodal ultrafine grain size distributions from severe plastic deformation at high strain rates," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no.1-2, pp. 187-191, 2009. https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.07.058

[52] F. Hassani and M. Ketabchi, "Nano grained AZ31 alloy achieved by equal channel angular rolling process," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 21, pp. 6426-6431, 2011. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.024

[53] Y. Q. Cheng, Z. H. Chen, and W. J. Xia, "Drawability of AZ31 magnesium alloy sheet produced by equal channel angular rolling at room temperature," *Materials characterization*, vol. 58, no. 7, pp. 617-622, 2017. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.07.007

[54] J. Peng, et al., "The effect of continuous confined strip shearing deformation on the mechanical properties of AZ31 magnesium alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 743, pp. 397-403, 2019. https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.069

[55] H. Hakimian, M. Sedighi, and A. Asgari, "Experimental and numerical study on the ECARed magnesium AZ31 alloy," *Mechanics & Industry*, vol. 17, no. 1, pp. 110, 2016. https://doi.org/10.1051/meca/2015055

[56] Q. Xu, et al., "Microstructure evolution of AZ91 alloy processed by a combination method of equal channel angular pressing and rolling," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 8, no. 1, pp. 192-198, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.05.012

[57] H. Zhao, et al., "Shear-induced hexagonal close-packed to face-centered cubic phase transition in pure titanium processed by equal channel angular drawing," J*ournal of Materials Science*, vol. 54, pp. 7953-7960, 2019. https://doi.org/10.1007/s10853-019-03430-x

[58] L. Shi, et al., "RETRACTED: Effect of Final Rolling Temperature on Microstructures and Mechanical Properties of AZ31 Alloy Sheets Prepared by Equal Channel Angular Rolling and Continuous Bending," *Materials*, vol. 13, no. 15, pp. 3346, 2020. https://doi.org/10.3390/ma13153346

[59] J. Y. Suh, et al., "Effect of deformation histories on texture evolution during equal-and dissimilar-channel angular pressing," *Scripta materialia*, vol. 49, no. 2, pp. 185-190, 2003. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00208-2

[60] I. Brodova, et al., "Deformation behavior of submicrocrystalline aluminum alloys during dynamic loading," *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2016, no. 4, pp. 342-348, 2016. https://doi.org/10.1134/S0036029516040066

[61] A. Habibi, M. Ketabchi, and M. Eskandarzadeh, "Fatigue behavior of nano-grained pure copper processed by equal channel angular rolling," *Scientia Iranica*, vol. 24, no. 2, pp. 656-661, 2017. https://doi.org/10.24200/sci.2017.4050

[62] Q. Xu, et al., "Microstructure and mechanical properties of SiCp/AZ91 composites processed by a combined processing method of equal channel angular pressing and rolling," J*ournal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 5244-5251, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.005

[63] M. Honarpisheh, M. Dehghani, and E. Haghighat, "Investigation of mechanical properties of al/cu strip produced by equal channel angular rolling," *Procedia materials science*, vol. 11, pp. 1-5, 2015. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.002